사각형 강관을 이용한 비개착 시공에 따른 지반거동의 분석: 수치해석

최순욱¹, 박영택², 장수호^{3*}, 배규진⁴, 이기택⁵, 백용기⁶

A numerical study on the three-dimensional ground movement by the trenchless construction method of concrete box by a square steel pipe supporting system

Soon-Wook Choi, Young-Taek Park, Soo-Ho Chang, Gyu-Jin Bae, Ki Taek Lee, Yong Ki Baek

ABSTRACT This study aims to numerically investigate ground movement around a square steel pipe as well as a group of square steel pipes induced by its and their ground penetration for trenchless construction of a concrete box. From numerical results, ground movement induced by a square steel pipe is much more dominantly governed by vertical displacement rather than horizontal displacement. Ground settlement induced by pipe penetration is much larger as the overburden becomes lower. The settlement is also shown to be slightly dependent upon the sequence of pipe penetration. More careful construction management is highly in demand during the penetration of upper pipes since their induced settlement occupies approximately 75 percent of total ground settlement after the whole construction of steel pipes.

Keywords: Trenchless construction, square steel pipe, penetration, settlement, ground movement

요 약 본 연구에서는 기존 도로나 철도 하부에 비개착 공법을 적용하여 입체교차 구조물을 시공할 경우, 비개착공법에 사용되는 사각형 강관의 1개 관입과 전체 강관들의 관입에 따른 상부 지반의 침하와 강관 주변의 변위를 3차원 수치해석으로 분석하여 비개착공사에 따른 지상의 안정성을 파악하고자 하였다. 이상의 수치해석 결과, 사각형 강관 관입에 의한 주변지반의 거동은 수평방향보다 연직방향의 변위에 크게 좌우되며, 토피고가 낮을수록 침하량이 보다 커지는 것으로 파악되었다. 강관 전체를 추진하는 해석에서는 강관들의 추진순서에 따라 침하량이 다소 다르게 나타났으며, 상부에 위치한 사각형 강관들 추진에 의해 발생하는 침하량이 총 침하량의 약 75%를 차지하는 것으로 나타나, 상부 강관 추진 시에 주의 깊은 시공관리가 필요할 것으로 판단되었다.

주요어: 비개착공사, 사각형 강관, 관입, 침하, 지반거동

접수일(2012.08.09), 수정일(2012.08.20), 게재확정일(2012.08.27)

¹정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 선임연구위원

⁵비회원, ㈜특수건설 기술개발팀 차장

⁶비회원, ㈜특수건설 이사

*교신저자: 장수호 (E-mail: sooho@kict.re.kr)

1. 서론

도로나 철도로 인해 단절된 지역 간의 연결과 이동을 위해, 기존의 도로와 철도 하부를 교차 통과하는 입체교차 구조물인 지하 연결통로의 수요가 증가하고 있다. 또한 생태적인 측면에서도 도로와 철도 구간의 로드킬(road kill)이 심각한 문제로 고려되고 있다.

이상과 같은 사회작경제적생태적 측면에서 도로와 철도 하부의 입체교차화 사업이 활발히 이루어지고 있으며, 더욱이 기존 고가도로와 육교를 철거하거나 신규 건설을 지양하고 있는 상황으로서 지하 연결통로를 건설하는 입체교차화 사업이 더욱 증가할 것으로 예상된다.

지하차도, 지하보도, 지하보차도 등과 같은 지하 연결통로는 주변 경관을 해치지 않으며 기후 변화에도 크게 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 있으나, 상대적으로 공사비가 비싸고 공사기간이 길다는 문제점이 있다.

따라서 지상의 기존 도로나 철도의 운행을 저해하지 않으면서 안전시공을 할 수 있는 경제적인 비개착 공법의 필요성이 더욱 증대되고 있다. 특히, 비개착 공사 시에 공사기간을 단축하고 공사비용을 절감할 수 있는 새로운 공법에 대한 개발 필요성이 대두되고 있다.

비개착공법은 크게 합체전인공법, 강관추진공법, 엘리먼트(element) 견인추진공법, 패널(panel) 추진공법 등으로 구분되며, 대표적으로 프론트잭킹(Front-Jacking), 파이프루프(Pipe-Roof), R&C(Roof & Culvert) 등을 예로 들 수 있다(한국철도시설공단, 2010). 특히 가장 대표적인 비개착공법인 프론트잭킹 공법은 다른 공법들과 비교할 때 외부에서 프리캐스트 콘크리트 구조물을 제작하므로 품질관리가 용이하며 선단압입 막장판 잭을 사용하여 상부의 영향이 적다는 장점을 가지고 있으며 우리나라에서도 널리 적용되고 있다. 이외에도 다양한 비개착공법들이 적용되고 있으나, 개착식 터널공법(배규진과 이규필, 2001; 배규진 등, 2003)과 비교할 때 관련 연구가 상대적으로 부족한 상황이다. 대구경 강관을 이용하는 N.T.R(New Tubular Roof Method), 파이프루프 공법의 일종인 AT-casing system 등에 대한 일부 사례들(한광모 및 박인준, 2002; 이영복 외 2003)을 제외하고는 비개착공법에 대한 우리나라의 연구개발은 매우 부족한 상황이다. 반면, 최근 들어 일본에서는 토사 굴착작업과 같은 작업공종을 줄이면서 강관을 재활용하여 공사기간과 공사비용을 줄일 수 있는 비개착공법인 SFT(Simple and Face-less method of construction of Tunnel)공법 등이 활발히 개발되고 있는 상황이다(アンダーパス技術協会, 2008).

일반적으로 이상과 같은 비개착공법들의 시공과정은 시공구간에 대한 방호공으로서 설치되는 원형 또는 사각형 강관의 관입작업, 방호공 하부에서 본 구조물 설치를 위해 수행되는 굴착작업 그리고 본 구조물 설치작업 등으로 구분될 수 있다. 특히, 다양한 비개착공법들에서는 일반적으로

횡단구간에 대해 강성이 큰 원형 강관이나 사각형 강관을 관입시켜 루프(roof)를 형성하여 강관 상부의 구조물 자중과 교통하중을 지지하는 개념을 이용한다. 이와 같이 원형 또는 사각형의 강관 루프가 상부하중을 지지하기 때문에 토피고가 낮은 조건에서도 비개착공법에 의한 시공이 가능하다.

엄기영 등(2001)이 현장계측을 통해 프론트잭킹 공법과 파이프루프 공법을 적용한 철도지하 횡단공사에 따른 지반거동을 분석한 결과, 두 공법 모두 강관 관입과 굴착공정에서 80% 이상의 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 특히 공정에 따른 변위발생 결과에 의하면 강관 관입 시에 지반의 변위가 가장 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

반면, 노정민(2006)은 비개착공법의 하나인 RPS(Roof Panel Shield)공법을 이용하여 지하횡단 구조물의 시공을 모사한 3차원 수치해석을 수행하였고, 그 결과 최종 단계에서 발생한 지표 변위량의 1/3이 강관루프의 형성 시에 발생하며 최대변위는 지반의 소성변형에 의하여 지표와 루프 사이에서 발생함을 규명하였다.

또한 엄기영 등(2010)은 모형토조 상부에 레이저센서를 설치하고 미리 매입된 원형 강관과 각형 강관의 이동에 따른 상부지반의 침하와 용기를 모사한 모형토조 실험을 통해, 비개착공법에서 관의 형태에 따른 지반의 침하량과 용기량을 비교하였다. 그 결과, 동일한 토피고에서 사각형 강관이 원형 강관보다 용기와 침하가 크게 발생하긴 하지만, 관의 형태에 의한 변위량보다는 토피고에 따른 변위량의 차이가 보다 크게 나타나는 것으로 발표하였다.

이상과 같이 비개착공법에서 강관의 관입에 따른 지반의 거동을 분석하는 것은 지하를 횡단하는 입체교차 구조물의 건설 시에 상부구조물의 보호를 위해 무엇보다 중요하다. 그러나 아직까지 비개착공법에 사용되는 원형 강관이나 사각형 강관의 관입에 따른 지반의 거동에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 재사용이 가능한 사각형 강관을 사용하면서 막장 굴착을 생략할 수 있는 SFT공법의 시공단계를 모사한 3차원 수치해석을 실시하여, SFT공법에 사용되는 사각형 강관의 관입에 따른 지반의 거동 특성을 분석하고자 하였다.

2. SFT공법의 개요

막장을 굴착하지 않는 비개착공법인 SFT공법에서는 시공 구간에 대한 방호공으로서 사각형단면의 강관 루프 부재(약 1 m×1 m 이내)들을 최종적으로 설치할 콘크리트 박스 구조물의 전체 외주면과 전체 시공구간을 관통하여 설치한다(그림 1). 이때 사각형 강관 상부에 FC 플레이트(Friction Cut plate)를 연속하여 배치하여 박스 구조물의 추진 또는 견인 시의 마찰저항을 저감시키고 주변 지반과 절연(絶緣)시킨다(그림 2).

(a) SFT공법의 시공사례

(b) SFT공법 개요

그림 1. SFT공법 개요(안더바스技術協會, 2008)

(a) 사각형 강관 루프 추진(수평부)

(b) 사각형 강관 루프 추진(연직부)

(c) FC플레이트 고정/박스 내부 흠막이 시공

(d) 유압 추진책에 의한 박스 추진

(e) 도달부 강관 회수 및 굴착토의 제거

(f) 시공 완료

그림 2. SFT공법의 시공순서

이 공법은 사각형 강관과 FC플레이트를 이용하여 주변지반과의 절연을 도모한다는 점에서는 R&C공법과 유사하지만, 박스 구조물의 외주면 전체에 사각형 강관을 설치한 후 사각형 강관과 사각형 강관 구조체 내부의 토사 모두를 동시에 박스 구조물로 치환한다는 점에서 큰 차이가 있다(赤司 孝 등, 2007). 즉, 사각형 강관과 사각형 강관 구조체 내부의 토사를 일체로 콘크리트 박스 구조물로 치환하게 되면, 토사 굴착작업과 같은 작업공종이 줄어들어 공기단축 효과가 있고 안정성 측면에서도 유리하다. 무엇보다도 시공에 사용된 사각형 강관을 회수하여 재사용할 수 있기 때문에 경제성 측면에서도 우수하다(アンダーパス技術協会, 2008).

3. 사각형 강관의 관입에 따른 지반거동 분석을 위한 수치해석

3.1 수치해석 조건 및 방법

일반적으로 비개착공법에 의한 지하 연결통로의 시공 시에 발생하는 변위는 앞서 설명한 바와 같이 강관의 관입에 의한 변위, 박스 구조물의 설치를 위한 강관루프 하부 굴착에 따른 변위, 그리고 박스 구조물의 설치에 의한 변위로 구분된다. 그러나 SFT공법에서는 박스 구조물의 설치를 위한 굴착작업이 필요 없기 때문에 사각형 강관의 관입에 따른 변위와 박스 구조물 설치단계에서의 변위만이 발생한다.

특히, 엄기영 등(2001)은 비개착공사 시에 박스 구조물 설치단계에서의 변위는 매우 미미한 것으로 보고한 바 있다. 또한 SFT공법에서는 사각형 강관들과 강관 내부의 토사들이 유압에 의한 추진이나 견인에 의해 콘크리트 박스 구조물로 치환될 때, 강관 외부에 FC플레이트가 설치되어 있기 때문에 박스 구조물 설치단계에서는 변위가 거의 발생하지 않는다(アンダーパス技術協会, 2008).

따라서 SFT공법에서 발생하는 지반 변위의 주요 원인은 지반을 오거(auger) 또는 인력으로 굴착함과 동시에 지반에 관입되는 사각형 강관들에 의해 발생하는 지반 변형이라고 할 수 있다. 특히, 굴착에 의해 사각형 강관의 전방과 상부의 토사가 각형 강관 내부로 이동하면서 침하가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 이상과 같은 지반 변형 메커니즘을 고려하여 사각형 강관의 추진 시에 발생하는 침하를 수치해석적인 방법으로 파악하고자 하였다. 그러나 길이가 2 m인 강관의 약 0.3~0.5 m 전방에서 이루어지는 지반 굴착작업을 연속체 해석에서 모사하기가 어려우며, 이러한 연속적인 굴착과정의 모사 없이 강관 전체가 지반을 지지하는 것으로 설정하게 되면 강관 추진에 의한 지반 변형이 발생하지 않는다는 문제가 있다. 또한 강관 전방의 굴착속도도 지반 변형에 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구의 연속체 해석에서는 이러한 강관 전방의 굴착과정을 수치해석 상에서 단순하게 묘사하기 위하여, 사각형 강관의 추진 시에 강관이 효과적으로 지반을 지지하는 지보 구간과 그렇지 못한 무지보 구간을 변수로 설정하여 수치해석을 실시하였다. 즉, 그림 3과 표 1과 같이 설정한 지반조건에서 지보 구간과 무지보 구간의 길이를 표 2와 같이 변화시켜가며 지보구간과 무지보구간의 길이 비율에 따른 지반의 거동을 파악하고자 하였다. 이때 무지보 구간의 최대 길이는 앞서 설명한 바와 같이 일반적으로 강관 전방의 최대 굴착위치인 0.5 m(표 2의 Case 1)로 설정하였다.

그림 3. 사각형 각관 추진의 3차원 수치해석을 위한 지반 요소망

표 1. 해석에 적용된 지반 특성

구분	탄성계수 (MPa)	포아송비 (ν)	단위중량 (kN/m^3)	점 착 력 (kN/m^2)	내부마찰각 ($^\circ$)
I(성토체)	22	0.3	19	15	25
II(풍화토층)	50	0.3	19	15	25
III(풍화토층)	100	0.3	19	15	25

표 2. 사각형 강관(길이 2 m) 추진 시의 지보 구간과 무지보 구간 비율에 따른 해석조건 구분

각형 강관 추진 해석조건	지보 구간	무지보 구간
Case 1	1.5 m(75.0%)	0.5 m(25.0%)
Case 2	1.6 m(80.0%)	0.4 m(20.0%)
Case 3	1.75 m(87.5%)	0.25 m(12.5%)

3차원 수치해석에 사용된 프로그램은 VisualFEA(GEO Ver. 4.21)이며, 해석대상은 가로 18 m, 세로 8 m, 길이 30 m인 콘크리트 박스 구조물로 설정하였다. 3차원 해석에서 요소 개수의 증가로 인한 해석시간의 증가를 최소화하고 해석모델의 대칭성을 고려하여 그림 3과 같이 경계조건을 고려한 반단면(가로 9 m×세로 8 m×길이 16 m)으로 모델링하였다. SFT공법과 같은 비개착공법은 토피고가 매우 낮은 구간에서도 적용이 되므로 토피고가 0.5 m, 2 m 및 5 m 인 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이때 토사 지반의 상부에는 DL-24 차선하중을 적용하였다.

사각형 강관의 단면 크기를 0.8 m×0.8 m (강관 두께는 19 mm)로 설정하였고, 해석에 적용된 강관의 특성은 표 3과 같다. 수치해석 시에는 2 m 단위로 사각형 강관을 시공하는 것으로 모델링 하였다. 또한 강관 루프 좌측의 최상단에 위치한 사각형 강관 1개가 관입되었을 때와 모든 사각형 강관들이 관입되었을 때로 구분하여 강관의 관입에 의한 지반의 거동을 파악하고자 하였다 (표 4).

3.2 사각형 강관 관입에 따른 지반 변위의 측정위치 설정

지반에 강관을 관입하는 비개착공법에서는 강관 전방의 토사를 오거 또는 인력에 의해 굴착함에 따라 강관 주변과 상부의 지반에서 변위가 발생하게 된다. 이러한 형태의 비개착공법에서 가장 주요한 시공관리 기준은 침하량으로서 한국철도시설공단(2010)에서는 10 m 종방향 길이에 대한 궤도의 고저차(부등침하)를 ± 7 mm 이내로 관리하도록 규정하고 있다.

본 연구에서는 3.1절에 설명한 바와 같은 사각형 강관의 추진 과정과 토피고에 따른 침하량의 변화를 수치해석을 수행하여 파악하고자 하였고, 특히, 사각형 강관을 1개만 관입했을 경우와 박스 구조물 외주면을 따라 모든 사각형 강관들을 관입하여 강관 박스를 형성한 경우의 침하량을 파악하고 비교하고자 하였다.

박스 구조물 외주면의 좌측 최상단에 위치한 사각형 강관 1개를 관입할 경우에 대한 수치해석에서는 그림 4와 같이 사각형 강관의 관입 시작위치로부터 진행방향으로 10 m에 위치한 횡단면에서 그림 5 및 그림 6과 같이 지표 침하량과 강관 주변의 지반 변위를 파악하기 위한 측정점을 설정하였다. 이는 사각형 강관 상부의 지표면에 DL-24 차선하중이 4차선으로 작용하도록 설정하였기 때문에, 지반 변위를 측정하는 횡단면 위치를 차선하중이 작용하지 않는 중간 위치인 8 m가 아니라 차선하중이 작용하는 10 m로 설정하기 위함이었다.

표 3. 해석에 적용된 사각형 강관의 특성

구분	단면크기	단면2차모멘트 ($\times 10^3 \text{ m}^4$)	탄성계수 (MPa)	단위중량 (kN/m^3)
사각형 강관	0.8 m× 0.8 m, 두께 19 mm	6.04	206,000	77

모든 사각형 강관들을 관입한 이후의 해석결과 분석 시에도 그림 4와 같은 위치의 횡단면에서 그림 5와 같이 강관 상부의 지표 침하를 분석하였다.

표 4. 강관 해석조건, 토피고 및 침하 측정위치에 따른 수치해석 조건 구분

사각형 강관 관입 개수	사각형 강관 관입 시 지보 구간과 무지보 구간의 비율 (표 2 참조)	토피고	침하 측정위치	구분 기호
A (사각형 강관 전체를 관입한 이후)	Case 1	H05 (토피고 0.5 m)	P1(지표침하)	A1-H05-P1
		H20 (토피고 2.0 m)	P1(지표침하)	A1-H20-P1
		H50 (토피고 5.0 m)	P1(지표침하)	A1-H50-P1
	Case 2	H05 (토피고 0.5 m)	P1(지표침하)	A2-H05-P1
		H20 (토피고 2.0 m)	P1(지표침하)	A2-H20-P1
		H50 (토피고 5.0 m)	P1(지표침하)	A2-H50-P1
	Case 3	H05 (토피고 0.5 m)	P1(지표침하)	A3-H05-P1
		H20 (토피고 2.0 m)	P1(지표침하)	A3-H20-P1
		H50 (토피고 5.0 m)	P1(지표침하)	A3-H50-P1
B (강관 루프 좌측 최상단의 사각형 강관 1개를 관입한 이후)	Case 1	H05 (토피고 0.5 m)	P1(지표침하)	B1-H05-P1
			P2(강관 주변침하)	B1-H05-P2
		H20 (토피고 2.0 m)	P1(지표침하)	B1-H20-P1
			P2(강관 주변침하)	B1-H20-P2
		H50 (토피고 5.0 m)	P1(지표침하)	B1-H50-P1
			P2(강관 주변침하)	B1-H50-P2
	Case 2	H05 (토피고 0.5 m)	P1(지표침하)	B2-H05-P1
			P2(강관 주변침하)	B2-H05-P2
		H20 (토피고 2.0 m)	P1(지표침하)	B2-H20-P1
			P2(강관 주변침하)	B2-H20-P2
		H50 (토피고 5.0 m)	P1(지표침하)	B2-H50-P1
			P2(강관 주변침하)	B2-H50-P2
	Case 3	H05 (토피고 0.5 m)	P1(지표침하)	B3-H05-P1
			P2(강관 주변침하)	B3-H05-P2
		H20 (토피고 2.0 m)	P1(지표침하)	B3-H20-P1
			P2(강관 주변침하)	B3-H20-P2
		H50 (토피고 5.0 m)	P1(지표침하)	B3-H50-P1
			P2(강관 주변침하)	B3-H50-P2

그림 4. 사각형 강관 관입에 따른 주변 지반의 변위 측정 단면

그림 5. 사각형 강관 관입에 따른 지표 침하량 측정위치(그림 4의 횡단면)

그림 6. 사각형 강관 1개를 관입할 경우의 지반변위 측정위치(그림 4의 횡단면)

4. 해석결과 및 분석

4.1 사각형 강관의 관입순서에 대한 예비해석

奥村組(2010)는 강관들의 관입에 의해 강관 박스를 형성하는 비개착공법에서는 강관의 관입순서, 즉, 강관들을 박스 구조물 외주면의 상부, 하부 및 측면 순으로 관입하는 방법(그림 7)과 하부, 상부 및 측면 순으로 관입하는 방법(그림 8)에 따라 상부 지표의 침하 정도가 달라질 수 있으므로 강관 관입순서에 대한 검토가 필요하다고 지적하였다. 따라서 본 연구에서는 SFT공법에서 강관들의 관입순서를 달리하였을 경우의 침하량을 우선 검토한 후에, 보수적인 측면에서 침하가 더 많이 발생하는 관입순서를 적용하여 본 해석을 수행하고자 하였다.

토피고가가 0.5 m이고 강관의 지보 구간과 무지보 구간의 비율을 표 2의 Case 1로 설정한 경우에 대해 강관의 관입순서에 따른 해석을 실시한 결과, 상부→하부→측면 순서일 경우에는 7.54 mm의 침하가 발생하였으나, 하부→상부→측면 순서일 경우에는 7.13 mm의 침하가 발생하는 것으로 나타났다(그림 7~그림 9). 이와 같은 예비해석으로부터 얻어진 강관 관입순서에 따른 침하량의 차이는 크진 않았으나, 보수적인 측면에서 본 해석 시에는 상부→하부→측면 순으로 해석을 수행하였다.

그림 7. 강관 관입순서에 따른 연직변위 분포도(상부→하부→측면 순서)

그림 8. 강관 관입순서에 따른 연직변위 분포도(하부→상부→측면 순서)

(a) 상부→하부→측면

(b) 하부→상부→측면

그림 9. 강관 관입순서에 따른 강관 루프의 연직변위 분포도

4.2 사각형 강관 1개 관입 시의 결과분석

그림 10은 사각형 강관 1개를 관입할 경우에 강관의 무지보 길이 비율에 따른 해석결과로서, 토피고의 조건별로 강관 관입깊이에 따른 강관 직상부 지반의 침하 추이를 정리한 것이다.

강관의 관입깊이가 2 m인 초기 관입단계의 연직변위는 상재 하중의 재하에 따른 것으로 사료되며, 무지보 길이 비율이 작아질수록 강관 직상부의 지표침하가 작게 나타났다. 또한 토피고가 커질수록 무지보 길이 비율에 따른 연직변위의 변화량이 커지는 것으로 나타났다.

사각형 강관의 관입 진행방향인 종방향으로 연직변위가 크게 변화하는 지점은 분석위치(10 m)를 중심으로 8~12 m 사이인 것으로 나타났다. 상재하중에 의한 초기 수직변위를 제외한 강관 1개 관입에 따른 지표 침하량은 강관의 무지보 구간 길이를 Case 1(지보 길이 1.5 m 및 무지보 길이 0.5 m)로 설정하고 토피고가 가장 낮은 0.5 m일 경우에 약 0.49 mm로서 가장 크게 나타났다. 반면, 토피고가 커질수록 사각형 강관 관입에 의한 연직변위는 크게 줄어드는 경향을 보였다. 또한 강관의 무지보 구간 길이의 비율이 작아질수록 강관 관입에 따른 연직변위는 감소하였고, 이러한 경향은 토피고가 커짐에 따라 더욱 뚜렷하게 나타났다.

또한 본 연구에서는 사각형 강관의 추진 조건별로 강관의 관입에 의한 주변지반의 영향 범위를 파악하였고, 그림 11은 지보 구간의 길이가 1.5 m이고 무지보 구간의 길이가 0.5 m인 경우에 대한 결과 예이다. 이때, 앞선 그림 6과 같이 설정한 지반변위 측정위치들에서 관입이 시작되어 완료될 때까지 연직변위의 최대 변화량을 파악하였고 상재하중에 의한 초기 수직변위를 제외한 것이다. 수평변위의 변화는 모든 경우에서 0.01 mm이하로 나타나 분석에서 제외하였다.

(a) 강관 추진 해석조건 Case 1

(b) 강관 추진 해석조건 Case 2

(c) 강관 추진 해석조건 Case 3

그림 10. 사각형 강관 1개 관입시 관입깊이에 따른 상부 지반의 침하량

(a) 토피고 0.5 m(해석조건 B1-H05-P2)

(b) 토피고 2.0 m(해석조건 B1-H20-P2)

(c) 토피고 5.0 m(해석조건 B1-H50-P2)

그림 11. 사각형 강관 1개 관입 시 토피고에 따른 강관 주변의 연직변위 변화 예(Case 1)

해석 결과, 사각형 강관의 1개 관입에 의해 각형강관에서 40 cm 이상 떨어진 주변 지반에서 발생한 연직변위는 강관의 좌측과 우측, 그리고 하부에서 0.1 mm 내외로 발생하였으나, 상부의 연직변위는 좌측과 우측의 수직변위에 비해 약 5배 정도 크게 나타났다. 또한 강관의 양쪽 좌우측에서는 강관으로부터의 이격 거리에 따른 차이가 크지 않았던 반면, 강관의 상하부에서는 토피고 조건에 크게 좌우되지 않고 강관으로부터의 이격 거리에 비례하여 연직변위가 달라지는 것으로 나타났다.

4.3 강관 루프 형성 이후의 결과분석

본 연구에서는 강관 1개의 관입에 따른 분석 이외에도 모든 사각형 강관들의 관입을 완료하여 강관 박스를 형성한 이후에 발생한 상부 지표면의 침하량을 파악하고자 하였다.

그림 12는 강관의 추진조건이 Case 2일 때 앞선 그림 5와 같이 설정한 측정점에서 발생한 해석단계별 지표침하의 변화 추세를 분석한 결과이다. 이때 앞서 설명한 바와 같이 분석대상은 강관의 관입깊이가 10 m인 단면으로 설정하였다 (그림 4 참조). 특히, 다수의 강관들의 관입에 따른 분석이 필요하기 때문에, 강관의 관입깊이에 따른 침하량의 분석보다는 해석단계에 따른 침하량을 분석하는 것이 효과적일 것으로 판단하여 해석단계별로 분석을 실시하였다. 그림 12에서 상부의 강관들을 관입시키는 단계는 0~8단계, 하부 관입은 9~16단계 그리고 측면부의 관입은 17~24단계에 해당한다. 또한 강관들의 관입 순서는 앞선 4.1절에서 분석한 바와 같이 상부, 하부 및 측면 순으로 설정하여 해석을 실시하였다.

해석 결과, 대부분의 침하는 상부 강관들의 관입깊이가 10 m에 도달하는 4~8단계에서 발생하는 것으로 나타났다. 상부 강관들의 추진이 완료되는 8단계를 기준으로 고려할 때, 그림 5의 측정위치 1-1에서의 지표침하는 하부 강관들의 관입이 이루어지지 않을 경우 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 박스 구조물의 중심부인 1-4 측정에서는 추진 조건이 Case 2일 때 상부 강관들의 관입에 의해서 최대 3.41 mm의 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 상부 강관들의 추진에 의해 발생한 침하량은 모든 강관들의 관입이 완료되는 24단계까지 발생한 전체 침하량 가운데 약 70~75%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 비개착공사 시에 상부 강관들의 관입 작업이 가장 중요한 공정이라고 할 수 있으며 시공 중에 가장 큰 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

또한 모든 강관들의 관입이 완료된 이후에 발생한 최종 침하량에는 토피고에 따른 상재 하중에 의해 발생한 침하량이 포함되어 있기 때문에 토피고에 따른 최종 침하량의 차이는 크지 않았다. 예를 들어, 강관 추진에 의한 침하량과 토피고에 의한 상재하중에 따른 초기 침하량을 비교해보면, 토피고가 0.5 m일 경우에는 강관 추진에 의한 순수 침하량이 상재하중에 의한 침하량보다 약 1 mm

(a) 토피고 0.5 m(해석조건 A2-H05-P1)

(b) 토피고 2.0 m(해석조건 A2-H20-P1)

(c) 토피고 5.0 m(해석조건 A2-H50-P1)

그림 12. 사각형 강관들의 관입 과정에 따른 지표 침하 발생 추이(Case 2)

크게 나타났으나, 토피고가 커지면 토피고에 비례하여 상재하중에 의한 초기 침하량은 커지는 반면 강관 추진에 의한 침하량은 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 토피고가 낮은 조건에서는 강관 관입에 의한 침하 발생에 대해 보다 주의 깊은 시공관리가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 도로나 철도 하부에 비개착 공법을 적용하여 입체교차 구조물을 시공할 경우, 비개착공법에 사용되는 사각형 강관의 관입과 강관들로 구축된 강관 루프로 인한 상부 지반의 침하와 강관 주변의 변위 발생 경향을 수치해석적으로 분석하였다. 이상의 연구로부터 도출된 주요 결과들을 정리하면 다음과 같다.

1. 사각형 강관들을 하부, 상부 및 측면 순서로 관입 시공하는 경우보다 상부, 하부 및 측면 순서로 관입할 경우에 상부 침하가 다소 크게 나타났으나 그 차이가 크지 않아 본 연구의 해석조건들에서는 강관들의 관입순서에 따른 침하량의 변화가 크지 않은 것으로 판단된다.

2. 사각형 강관을 1개 관입하는 조건에 대한 해석 결과, 토피고가 커질수록 사각형 강관의 관입에 의해 발생하는 연직변위가 크게 감소하는 경향이 나타났다. 또한 강관의 무지보 구간 길이가 짧아질수록 강관에 의한 연직변위가 감소하였고 이러한 경향은 토피고가 커질수록 더욱 명확하게 나타났다. 그러나 본 연구의 해석조건에서, 사각형 강관 1개 관입에 의한 침하량은 최대 0.49 mm에 불과하여, 단일 강관의 관입은 상부에 영향을 거의 주지 않는 것으로 사료된다.
3. 강관 관입에 의해 발생한 수평변위는 0.01 mm에 불과한 반면, 강관에서 40 cm 떨어진 지점에서는 0.1 mm 이하의 연직변위가 발생하는 것으로 분석되어, 사각형 강관의 관입에 따른 주변 지반의 변형은 연직방향으로의 변위가 지배적인 것으로 나타났다. 또한 강관 상부에서 발생하는 연직변위는 강관 좌우측에서 발생하는 연직변위보다 약 5배 정도 크게 나타나, 강관 상부의 변위 발생이 주된 지반 변형의 원인임을 알 수 있었다.
4. 상부에 위치한 사각형 강관들의 관입에 의해 발생한 침하량은 모든 강관들의 관입이 완료될 때까지 발생한 총 침하량의 약 70~75%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 강관을 이용하는 비개착공사 시에는 상부 강관들의 관입 작업에 대해 가장 주의 깊은 시공관리가 필요할 것으로 판단된다.
5. 본 연구의 해석조건에서 사각형 강관들의 관입에 의해 발생한 침하량은 최대 4.41 mm로서 일반적인 시공 관리기준인 7 mm이하로 나타났다. 또한 강관 상부의 토피고가 줄어들수록 상재하중에 의한 초기 침하량은 줄어드는 반면, 강관 추진에 의한 침하량은 상대적으로 증가하였다. 따라서 저토피 시공조건에서는 강관 추진 시에 지표 침하 발생여부를 보다 세심하게 계측 관리하는 것이 필요할 것으로 판단된다.
6. 본 연구에서는 비개착공사에 사용되는 사각형 강관들의 관입 과정을 모사하기 위하여 강관의 길이를 지보 구간과 무지보 구간으로 구분하는 단순한 개념의 해석방법을 적용하였으나, 본 연구의 수치해석 결과와 모형 토조실험 결과 또는 현장 계측자료와의 비교분석을 통해 실제 현상에 가까운 해석방법을 도출하기 위한 추가 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 (주)특수건설에서 발주한 “입체교차 지하통로 건설을 위한 비개착 박스 암거 추진공법의 적용성 평가 연구” 사업으로 이루어진 것으로서 본 연구를 지원해준 (주)특수건설 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 노정민 (2006), “RPS공법을 이용한 횡단터널 굴착의 수치해석”, 인천대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 배규진, 이규필 (2001), “복개터널 라이닝 해석을 위한 모델링 기법에 관한 연구”, 터널기술, 제3권, 제2호, pp. 13-22.
3. 배규진, 정형식, 이규필 (2003), “복개 터널구조물에 작용하는 편토압 고려를 위한 수치해석적 연구”, 터널기술, 제5권, 제3호, pp. 227-239.
4. 엄기영, 신민호, 김지훈 (2001), “철도지하횡단공사시 현장계측을 통한 지반거동 분석”, 한국철도학회, 2001년도 추계학술대회논문집, pp. 546-551.
5. 엄기영, 최찬용, 천정연 (2010), “비개착 추진공법에서 관의 형태에 따른 축소모형 용기 및 침하 실험분석”, 한국토목섬유학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 9-15.
6. 이영복, 김정윤, 박인준, 김경곤, 이정호 (2003), “대구경강관을 이용한 지하구조물 축조공법의 국내지반 적용성 연구”, 터널기술, 제5권, 제4호, pp. 401-409.
7. 한광모, 박인준 (2002), “환경친화적인 저토피 터널굴착 공법”, 터널기술, 제4권, 제3호, pp. 207-216.
8. 한국철도시설공단 (2010), “고속철도 지하횡단구조물 공법기준 정립 및 안정성평가 연구 최종보고서”, 한국철도기술연구원, 2010년 11월.
9. 赤司 孝, 上野邦彦, 三好勝彰, 丸田新市 (2007), “最新工法による大断面地下構造物の超短期施工法 -SFT工法によるアンダーパス施工”, 月刊「土木施工」, 8月号, Vol. 48, No. 8, pp. 5-14.
10. 奥村組 (2010), “SFT工法におけるルーフ施工手順変更に伴う影響検討”, 東名高速道路 瀬谷地区歩道函渠工工事.
11. アンダーパス技術協会 (2008), “SFT工法を用いたボックスカルバートの施工”, 日豊本線 財光寺～南日向間”, 日本鐵道施設協會誌, 2008. 4. Vol. 46, pp. 306-308.